

Modelo de simulación hidráulica de drenaje dual en un área urbana para predicción de inundaciones en tiempo real

Bermúdez, M.^{a1}, Ntegeka, V.^{b1}, Wolfs, V.^{b2} y Willems, P.^{b3}

^aGrupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, Campus de Elviña s/n. E-mail: ^{a1}maria.bermudez@udc.es

^bHydraulics Section, Department of Civil Engineering, KU Leuven, Belgium. E-mail: ^{b1}victor.ntegeka@kuleuven.be, ^{b2}vincent.wolfs@kuleuven.be,

^{b3}patrick.willems@kuleuven.be

Línea temática | M. Tema monográfico

RESUMEN

Los modelos de drenaje dual urbano 1D-2D han demostrado unas buenas capacidades para la predicción de inundaciones de origen pluvial. Sin embargo, sus tiempos de cálculo suelen ser demasiado largos para aplicaciones prácticas que requieren simulaciones en tiempo real. En este estudio se proponen y aplican dos modelos sustitutos de un modelo de drenaje dual 1D-2D para la predicción de inundaciones en tiempo real. El primer modelo está basado en un modelo unidimensional detallado de la red de saneamiento, acoplado a un modelo de propagación de la inundación superficial de tipo SIG. El segundo modelo se basa en un modelo conceptual del sistema de drenaje dual que combina componentes de base física y modelos guiados por datos. Como caso de estudio se considera la ciudad de Gante (Bélgica). Los resultados muestran como ambos modelos pueden proporcionar buenas estimaciones de los volúmenes de agua en superficie, así como mapas de inundación con una precisión adecuada para la mayor parte de aplicaciones potenciales.

Palabras clave | inundación pluvial; modelo de drenaje dual; modelo conceptual.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de drenaje dual urbano 1D-2D han demostrado unas buenas capacidades para la predicción de inundaciones de origen pluvial (van Dijk et al., 2014). Dichos modelos están formados por un modelo bidimensional de flujo en superficie y un modelo unidimensional de flujo en la red de saneamiento, acoplados bidireccionalmente. Este tipo de modelos están disponibles en software comerciales como SOBEK, XP-SWMM 2D, MIKE FLOOD o InfoWorks ICM, y se aplican habitualmente en estudios de inundaciones urbanas (Schmitt et al, 2004; Carr y Smith, 2006; Jahanbazi y Egger, 2014). Sin embargo, sus tiempos de cálculo suelen ser demasiado largos para los sistemas de predicción en tiempo real de inundaciones o para enfoques probabilísticos que requieren múltiples simulaciones. De ahí el interés en desarrollar modelos subrogados o sustitutos, computacionalmente más eficientes.

En este contexto, se pueden considerar dos enfoques generales de modelización: el uso de modelos físicos de menor fidelidad, en los que se simplifican algunos de los procesos del modelo original, y el desarrollo de modelos guiados por datos que emulan las respuestas del modelo original sin analizar los procesos físicos involucrados (Razavi et al., 2012). Un ejemplo de modelo físico de menor fidelidad es el uso de una representación simplificada de la red de saneamiento junto con el modelo 2D de superficie original. Los elementos secundarios de la red de saneamiento pueden ser eliminados o cambiados, en lo que a veces se denomina esqueletizar la red (Leitao et al., 2010; Simoes et al., 2010). En otros enfoques más simples, la red de alcantarillado se puede representar mediante la sustracción de una tasa constante de precipitación (Environment Agency, 2013; Van Dijk et al., 2014) o utilizando una tasa de infiltración constante (Chen et al., 2009). Este tipo de aproximaciones pueden ser interesantes si el drenaje subterráneo no tiene mucha influencia en el fenómeno de inundación o si no se dispone de datos de la red de saneamiento (Henonin et al., 2013). Sin embargo, dado que el modelo superficial 2D es generalmente más costoso

computacionalmente que el modelo de red 1D, estos enfoques no se traducen necesariamente en una reducción de los tiempos de cálculo.

Alternativamente, un modelo físico de menor fidelidad puede basarse en un modelo 1D detallado de la red de saneamiento en el que se simplifica el sistema superficial. En los enfoques más simples, la superficie urbana está representada por depósitos virtuales ubicados en la parte superior de los pozos, que almacenan temporalmente en volumen de agua desbordado durante un evento de inundación. Este enfoque por sí solo no permite evaluar la dinámica de la inundación, pero sí puede proporcionar una estimación de los posibles lugares de desbordamiento de la red (Maksimovic y Prodanovic, 2001). Por otro lado, la superficie urbana puede ser representada mediante una red de canales y estanques conectados al sistema de alcantarillado, formando lo que se conoce como un modelo de drenaje dual 1D-1D (Maksimovic et al., 2009). Este enfoque puede proporcionar resultados precisos si el flujo superficial está bien canalizado y la dispersión lateral de la onda de inundación no es significativa (Mark et al., 2004; Lhomme et al., 2006; Leandro et al., 2009). Si este no es el caso, como en zonas planas con trayectorias del flujo multidireccionales, se requiere un modelo bidimensional del flujo superficial. Dentro de este tipo de modelos, las aproximaciones físicas de menor fidelidad pueden resolver formas simplificadas de las ecuaciones de Saint Venant 2D, típicamente la aproximación de inercia local o la de la onda difusiva (Neal et al., 2012), o utilizar mallas gruesas junto con modelos submalla que incorporan la variabilidad topográfica que no es posible resolver con esa resolución espacial (Schubert y Sanders, 2012). En estudios que requieren un dominio computacional extenso también es posible emplear modelos anidados, de forma que se utilice una malla fina en las áreas de interés sin incurrir en el coste computacional de una alta resolución espacial en todo el dominio (Bermúdez et al., 2017). Estos modelos pueden todavía no satisfacer plenamente las necesidades de los sistemas de gestión de desastres debido a su complejidad, las necesidades de datos y los tiempos de cálculo. Por ello, en los últimos años se han propuesto otras simplificaciones como los modelos de inundación basados en sistemas de información geográfica (Jahanbazi y Egger, 2014; Zhang y Pan, 2014) o en los modelos de autómatas celulares (Ghimire et al., 2013; Liu et al., 2015).

Los modelos guiados por datos, que emulan las respuestas del modelo original sin analizar los procesos físicos involucrados, complementan cada vez más a los modelos de base física (Solomatine y Ostfeld, 2008). En el campo de los recursos hídricos, las redes de neuronas artificiales (RNA) son una técnica popular (Razavi et al., 2012), capaz de emular complejas relaciones de entrada/salida. Han sido extensamente aplicadas para modelizar los procesos lluvia-escorrentía y para la predicción de caudales (Yasseen et al., 2015), pero las aplicaciones a la hidrología e hidráulica urbana son todavía escasas. Duncan et al. (2011, 2013) aplicaron modelos RNA para predecir la inundación en los nodos de una red de saneamiento en base a la lluvia, mientras que Mounce et al. (2014) emplearon este tipo de modelos para emular la dinámica de descargas de los sistemas unitarios (DSU), relacionando la precipitación y la profundidad del flujo en los depósitos anti-DSU. Wolfs y Willems (2017) desarrollaron recientemente un modelo conceptual de un sistema de saneamiento que divide el sistema en células interconectadas y utiliza modelos RNA para estimar los flujos entre ellas. En estos estudios se alcanzaron reducciones de tiempo de cálculo significativas con una reducción de precisión asumible para la mayor parte de aplicaciones potenciales, lo que pone de relieve el potencial de estos modelos para la predicción de inundaciones en tiempo real.

En este estudio se proponen y aplican dos modelos sustitutos de un modelo de drenaje dual 1D-2D que combinan modelos de base física y modelos guiados por datos. Como caso de estudio se considera la ciudad de Gante (Bélgica). Se evalúan y comparan sus capacidades para el estudio de inundaciones pluviales.

METODOLOGÍA

Caso de estudio

Como caso de estudio se considera la ciudad de Gante en Bélgica. El área estudiada cubre 27.5 km² y está altamente urbanizada, con una población equivalente de 43,626 habitantes.

Para la calibración de los modelos se utilizan 8 tormentas sintéticas con períodos de retorno de 2 a 100 años, 6 eventos obtenidos mediante un generador de precipitación estocástico (Muñoz et al., 2015) y 120 eventos basados en la precipitación registrada en la estación de Uccle, en la que se dispone de una serie temporal de más de 100 años (Ntegeka y Willems, 2008). Para la validación de los modelos se utilizan dos eventos históricos ocurridos el 28 de julio de 2013 y el 30 de mayo de 2016. Para evaluar el funcionamiento del modelo se definen 4 regiones dentro del área de estudio, con un área aproximada de 0.3 km² (Figura 1).

Modelo de drenaje dual 1D-2D

El modelo original, un modelo de drenaje dual urbano 1D-2D, está implementado en el software InfoWorks ICM (Innovyze, 2015). El modelo cuenta con un total de 6025 conductos, 182 estructuras hidráulicas y 5855 pozos (Figura 1). La malla superficial tiene un tamaño entre 3.75 m² y 50 m² en las zonas propensas a inundaciones. La interacción entre los conductos subterráneos 1D y la superficie 2D se realiza a través de los pozos, conceptualizados como vertederos. El flujo de escorrentía superficial a los pozos se calcula mediante el modelo de doble embalse lineal (o modelo Wallingford), en base a la precipitación.

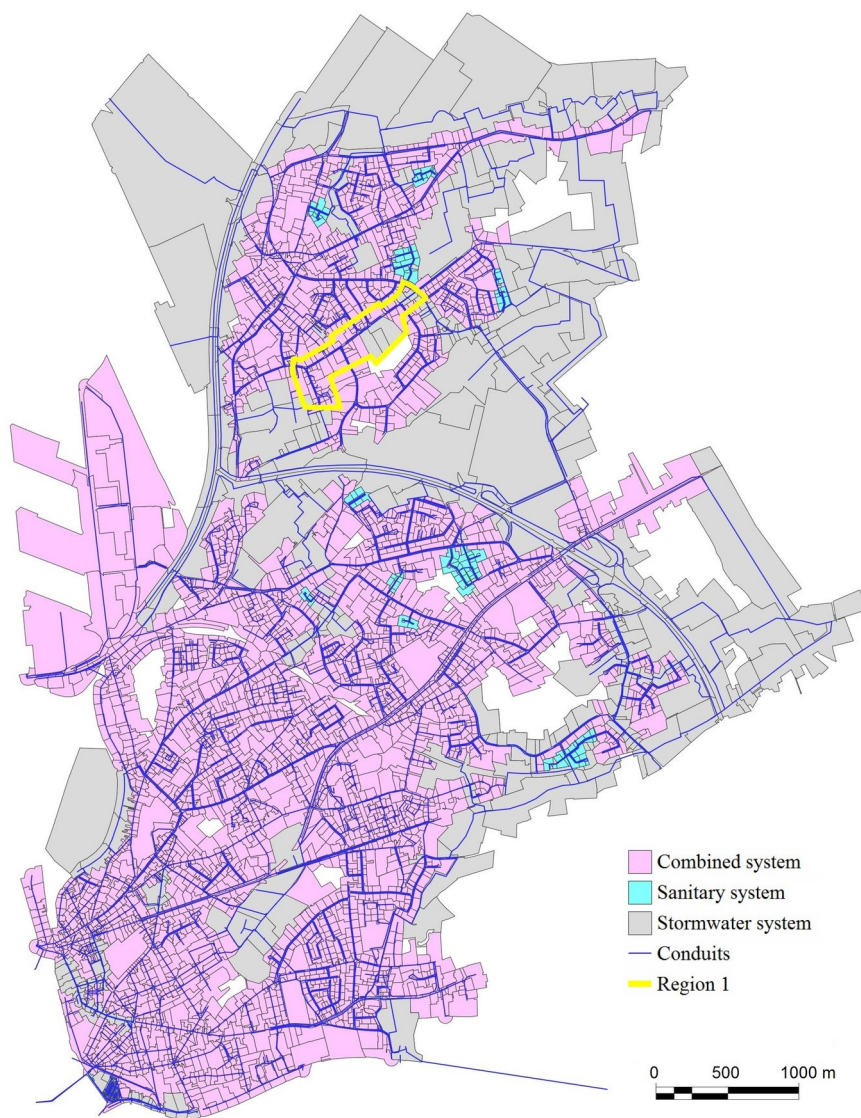


Figura 1 | Definición del sistema de saneamiento en el modelo dual 1D-2D. Se muestra en amarillo una de las cuatro regiones analizadas.
V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

Modelo sustituto 1

En este estudio se proponen y aplican dos modelos sustitutos del modelo de drenaje dual 1D-2D anterior (Figura 2). El primer modelo se basa en un modelo unidimensional detallado de la red de saneamiento en el que la superficie urbana está representada por depósitos virtuales ubicados en la parte superior de los pozos, que almacenan temporalmente el volumen de agua desbordado durante un evento de inundación. Para cada pozo se define un volumen cónico de almacenamiento, utilizando una definición por defecto basada en el área de drenaje de cada nodo y una definición mejorada basada en el área inundable estimada a partir de la topografía superficial. Se consideran por tanto dos posibles modelos, que se diferencian únicamente en los volúmenes de almacenamiento en cada nodo, y que se denominan modelo 1A y modelo 1B.

A partir de los volúmenes de inundación obtenidos en cada nodo se genera un mapa de inundación mediante un algoritmo de propagación basado en un análisis SIG de la topografía superficial. El método está basado en un algoritmo iterativo que mueve los volúmenes de inundación sobre el terreno desde una celda a otra del modelo digital de elevaciones, y es similar al procedimiento aplicado en Shapiro y Westervelt (1992) y Shook et al. (2013).

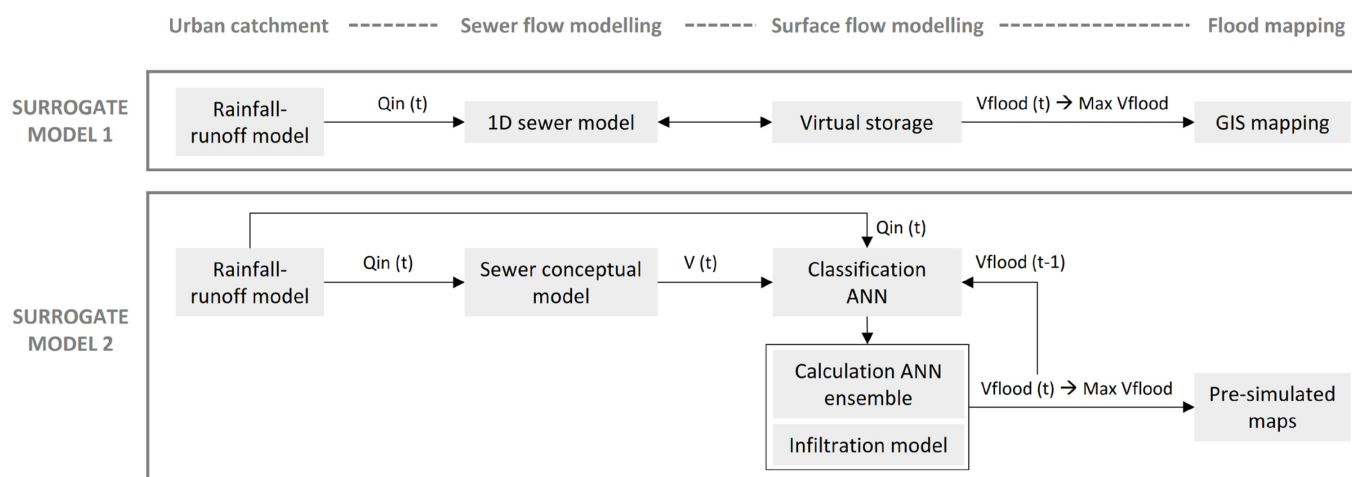


Figura 2 | Esquema de los dos modelos propuestos.

Modelo sustituto 2

El segundo modelo sustituto combina componentes de base física y modelos guiados por datos en el marco de un modelo conceptual del sistema de drenaje dual. En primer lugar, el modelo emula los volúmenes en el sistema de saneamiento utilizando una topología de red conceptual, como se describe en Wolfs y Willems (2017). El modelo utiliza como dato de entrada la precipitación y calcula los volúmenes en la red, que está formada por un total de 13 subcuencas o elementos de almacenamiento. Los flujos entre estos elementos de almacenamiento se emulan mediante una variedad de estructuras de modelo, como redes neuronales o funciones de transferencia (más detalles en Wolfs y Willems, 2017).

Posteriormente, el modelo estima los volúmenes de inundación superficial, agregados en las regiones predefinidas del área de estudio, mediante una conexión en serie de dos redes de neuronas artificiales (RNA). La contribución lluvia-escorrentía, promediada en una ventana temporal de 10 y 30 minutos, y el volumen en la red de saneamiento son los datos de entrada. La primera RNA clasifica los datos de entrada para determinar si se produce una inundación en la región considerada. Si esta RNA predice que va a producirse una inundación, la segunda RNA calcula la magnitud del volumen de inundación. La primera red tiene 10 neuronas ocultas en una capa y fue entrenada usando el método de gradiente conjugado escalado minimizando la entropía cruzada. La segunda RNA es en realidad un conjunto de 5 RNAs, para reducir el riesgo de sobreajuste y aumentar la capacidad de generalización. Estas RNAs tienen entre 15 y 25 neuronas en una capa oculta.

Para predecir la distribución espacial de la inundación dentro de cada región se utilizan eventos sintéticos pre-simulados, seleccionándose el mapa de inundación más próximo en volumen de inundación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar el funcionamiento de los modelos sustitutos, se comparan los resultados de los mismos con los obtenidos con el modelo dual 1D-2D original. La comparación se realiza para cada región predefinida en términos de: (1) evolución del volumen total de inundación en superficie, (2) predicción del pico de volumen total de inundación en superficie y (3) mapa de inundación correspondiente al volumen pico anterior. En el primer caso se emplea como métrica de ajuste el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) calculado sobre el período mostrado en las Figuras 3 y 4. En el segundo caso, se calcula el error en la estimación del volumen pico, que se expresa en valor absoluto y como porcentaje del volumen pico. En el caso de los mapas de inundación, se utilizan como métricas la precisión, la exhaustividad (recall) y la medida F1, para comparar las áreas inundadas de acuerdo con cada uno de los modelos.

Predicción del volumen de inundación

Los resultados muestran como el primer modelo sustituto puede identificar correctamente la ocurrencia de una inundación y ubicar correctamente los desbordamientos de la red de saneamiento. Las predicciones de volumen de inundación en superficie con este modelo son sensibles a la definición del volumen cónico de almacenamiento de cada pozo. La definición por defecto (modelo 1A) subestima significativamente los volúmenes de inundación, que son entre un 30 y 67% menores a los obtenidos con el modelo 1D-2D original, dependiendo de la región y el evento considerado (Tabla 1). Cuando estos volúmenes se definen de acuerdo a la topografía superficial (modelo 1B), la predicción de los volúmenes de inundación en superficie mejora significativamente. Los errores en volumen de inundación pico se sitúan entre el 2 y el 27% en este caso. En lo referente a la dinámica temporal, este primer modelo puede predecir correctamente el inicio de la inundación, pero no la evolución de la misma, como se refleja en los bajos coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenidos (Tabla 1). Los volúmenes de inundación superficial retornan a la red subterránea de forma casi inmediata, ya que este modelo no reproduce el almacenamiento en depresiones locales que sólo se infiltra o evapora lentamente. Por ello, este modelo resulta en duraciones menores de inundación y en subestimaciones de volumen máximo de inundación en algunos eventos con más de un pico (por ejemplo, en la región 3 en el evento de mayo 2016, Figura 4).

El segundo modelo sustituto permite identificar la ocurrencia de una inundación a nivel de región, por su propia configuración agregada en regiones. No es posible identificar los pozos concretos en los que se producen los desbordamientos, como en el caso del modelo 1. Este segundo modelo proporciona buenas estimaciones de volumen pico de inundación, a excepción de en la región 3 (Tabla 1). Así, ninguno de los modelos propuestos proporciona una buena predicción del volumen máximo de inundación en esta región 3, aunque sí identifican correctamente la ocurrencia de la misma. El segundo modelo sustituto emula razonablemente bien la evolución temporal de los volúmenes de inundación, como se refleja en los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenidos (por encima de 0.80 en las regiones 1, 2 y 4). Podría ser por tanto utilizado para predecir la dinámica de inundación en estas regiones.

Tabla 1 | Valores de NSE y errores en volumen pico obtenidos para cada modelo con respecto al modelo 1D-2D original en los dos eventos estudiados. R1 a R4 son las regiones de análisis.

Evento	Métricas	Modelo 1A				Modelo 1B				Modelo 2			
		R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4
Julio 2013	NSE	-0.16	0.54	-0.57	-0.25	0.61	0.97	-0.37	0.42	0.96	0.94	0.61	0.94
	Error volumen (m3)	-198	-234	-45	-80	-80	-82	-23	-26	-39	-87	39	-1
	Error volumen (%)	-52	-40	-43	-67	-21	-14	-23	-22	-10	-15	37	-1
Mayo 2016	NSE	-0.52	0.67	-2.47	-1.33	0.66	0.80	-2.06	-0.63	0.98	0.97	-1.17	0.80
	Error volumen (m3)	-539	-597	-57	-46	-239	-32	-31	-15	29	-157	136	12
	Error volumen (%)	-60	-38	-30	-65	-27	-2	-16	-21	3	-10	71	17

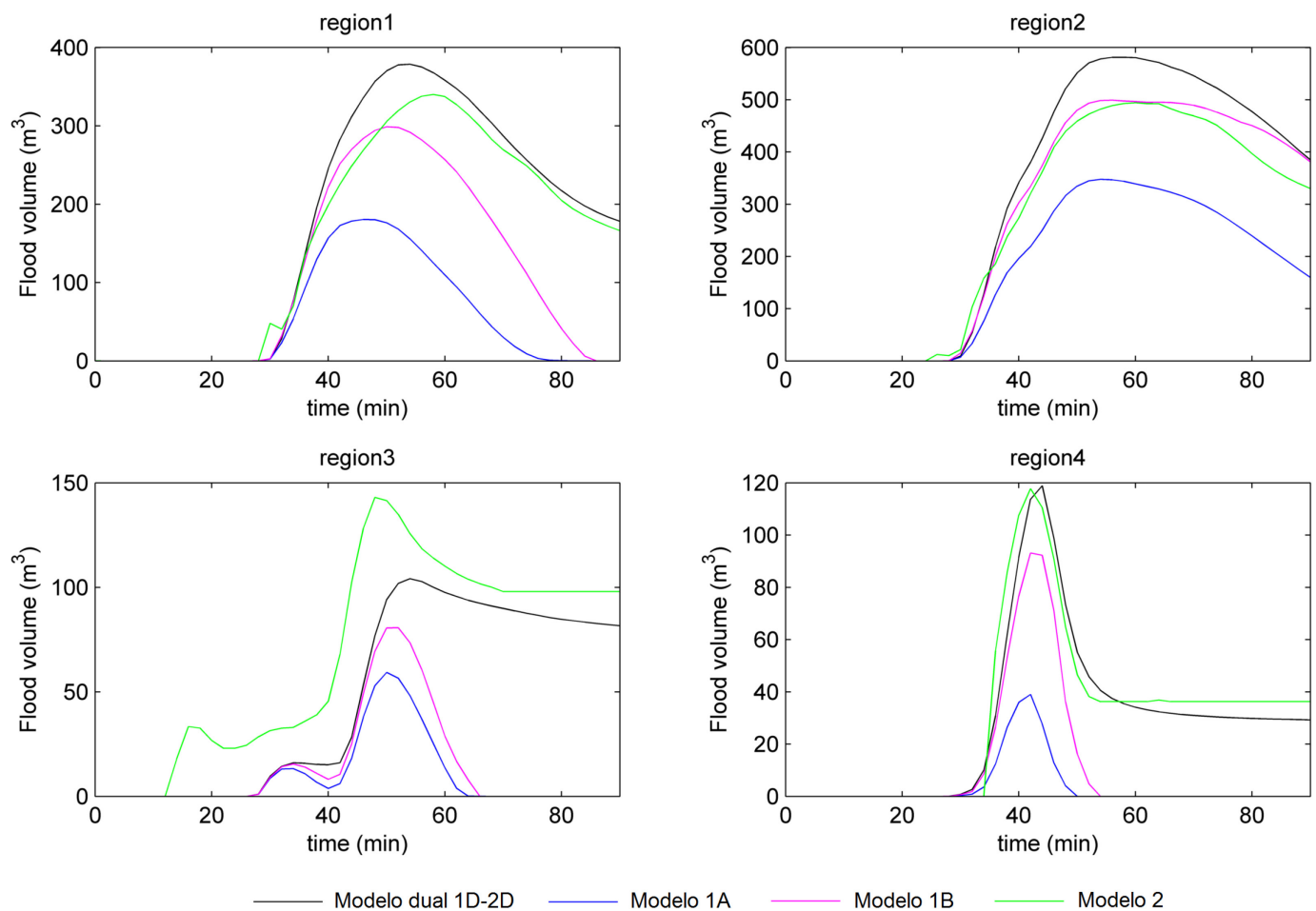


Figura 3 | Volumen de inundación superficial en cada región calculado con cada uno de los modelos para el evento histórico de julio 2013.

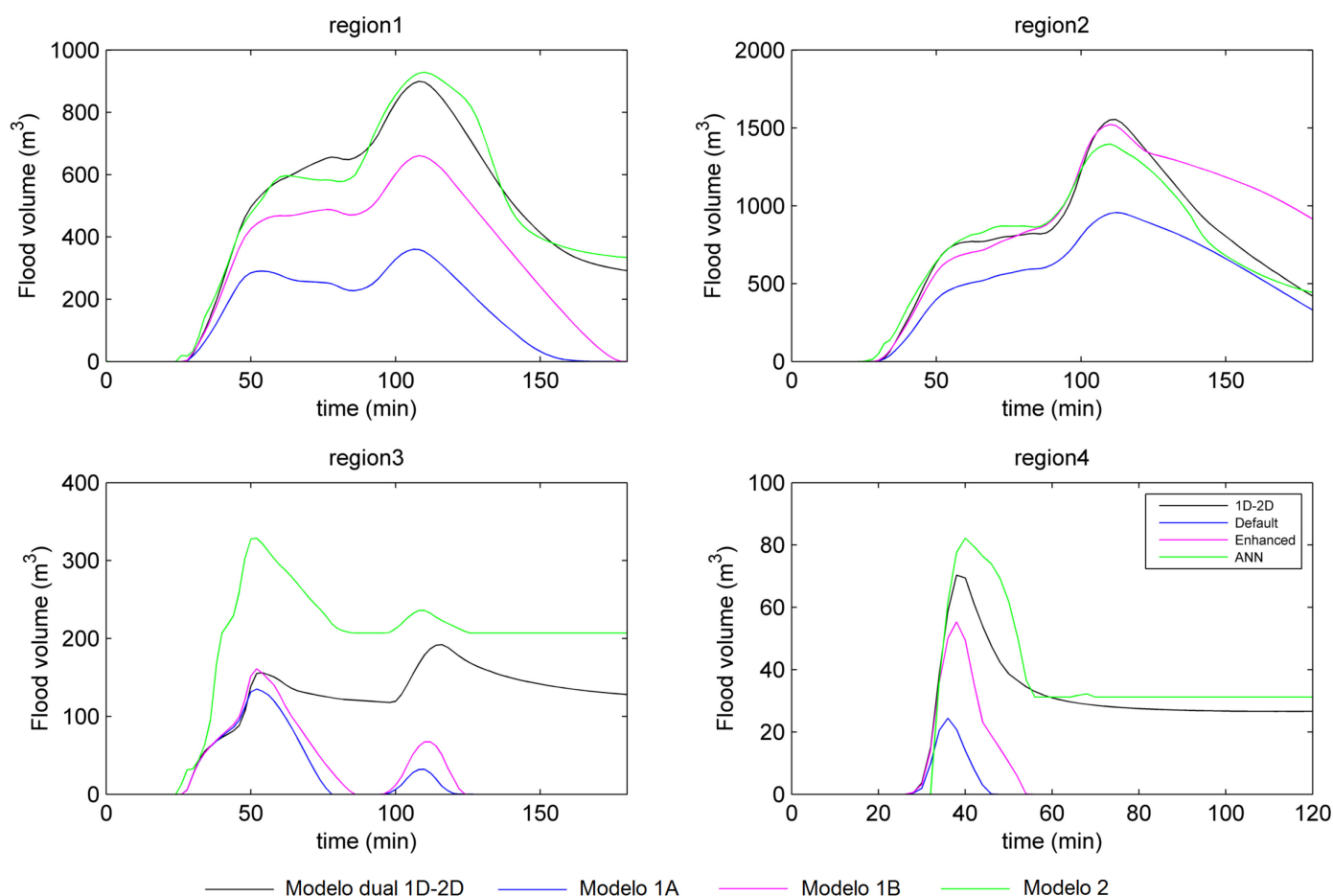


Figura 4 | Volumen de inundación superficial en cada región calculado con cada uno de los modelos para el evento histórico de mayo 2016.

Estimación de mapas de inundación

Los modelos sustitutos desarrollados utilizan el volumen máximo de inundación como dato de entrada para calcular los mapas de inundación. Dadas las pobres predicciones de volumen pico de inundación obtenidas con el modelo sustituto 1A, sólo se comparan en esta sección los mapas de inundación obtenidos con el modelo 1B y el modelo 2. Como se muestra en la Tabla 2 y las Figuras 5 y 6, es posible obtener mapas de inundación máxima razonablemente precisos a escala de calle con ambos modelos sustitutos.

Tabla 2 | Valores de precisión, recall y medida F1 de los mapas de inundación obtenidos para cada modelo con respecto al modelo 1D-2D original en los dos eventos estudiados. R1 a R4 son las regiones de análisis.

Evento	Métricas	Modelo 1B				Modelo 2			
		R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4
Julio 2013	precisión	0.73	0.8	0.57	0.71	0.97	0.95	0.59	1
	recall	0.52	0.59	0.41	0.53	0.95	0.91	0.32	0.64
	F1	0.61	0.68	0.48	0.6	0.96	0.93	0.41	0.78
Mayo 2016	precisión	0.75	0.82	0.38	0.57	0.87	0.83	0.42	0.99
	recall	0.47	0.78	0.29	0.45	0.87	0.92	0.62	0.94
	F1	0.58	0.80	0.33	0.50	0.87	0.88	0.50	0.97

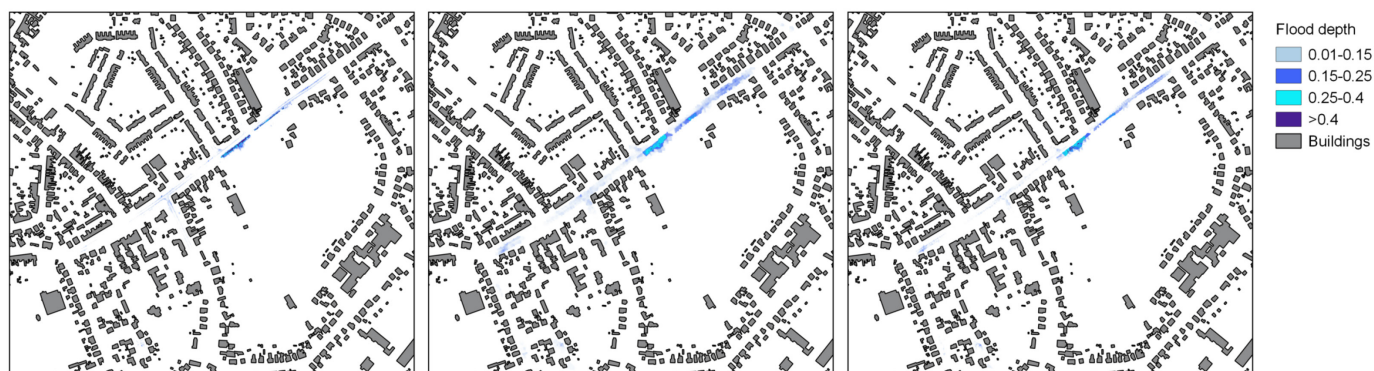


Figura 5 | Mapa de inundación calculado con el modelo 1D-2D original (izquierda), el modelo 1B (medio) y el modelo 2 (derecha) para el evento histórico de julio 2013 en la región marcada en la Figura 1.

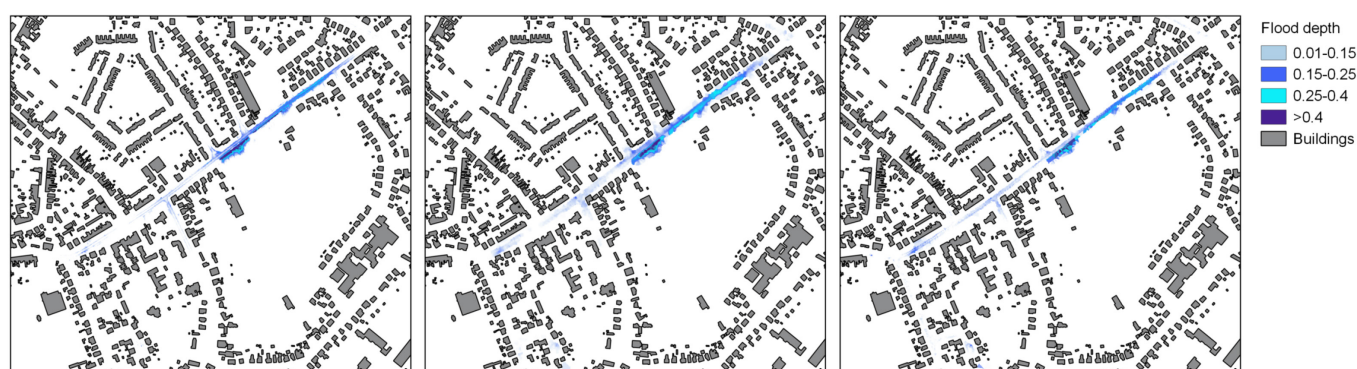


Figura 6 | Mapa de inundación calculado con el modelo 1D-2D original (izquierda), el modelo 1B (medio) y el modelo 2 (derecha) para el evento histórico de mayo 2016 en la región marcada en la Figura 1.

CONCLUSIONES

En este estudio se proponen y aplican dos modelos sustitutos de un modelo de drenaje dual 1D-2D. Los resultados muestran como el primer modelo sustituto puede ubicar correctamente los desbordamientos de la red de saneamiento y proporcionar una estimación del volumen máximo de inundación en superficie. A partir de estos datos es posible obtener un mapa de inundación máxima razonablemente preciso en base a la topografía de la superficie urbana. El segundo modelo sustituto puede emular con precisión la evolución de los volúmenes de inundación y puede ser por tanto utilizado para predecir la dinámica de inundación. Con ambos modelos se reducen drásticamente los tiempos de cálculo (más de 100 veces con respecto al modelo original), lo que posibilita su uso en aplicaciones como la predicción en tiempo real.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Innovyze la licencia del modelo InfoWorks ICM y a la empresa Farys el modelo original 1D de la red de saneamiento de la zona de estudio. María Bermúdez agradece a la Xunta de Galicia la concesión de su contrato postdoctoral (referencia ED481B 2014/156-0). Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto PLURISK de la Belgian Science Policy Office.

REFERENCIAS

- Bermudez, M., J. C. Neal, P. D. Bates, G. Coxon, J. E. Freer, L. Cea, y J. Puertas (2017), Quantifying local rainfall dynamics and uncertain boundary conditions into a nested regional-local flood modeling system, *Water Resources Research*, 53, doi:10.1002/2016WR019903.
- Carr, R. S., & Smith, G. P. (2006). Linking of 2D and Pipe hydraulic models at fine spatial scales. In 7th International Conference on Urban Drainage Modelling and 4th International Conference on Water Sensitive Urban Design.
- Chen, A. S., Djordjevic, S., Fowler, H. J., Burton, A., Walsh, C., Harvey, H., ... Wood, G. (2009). Pluvial flood modelling of the South East London Resilience Zone in the Community Resilience to Extreme Weather (CREW) Project. In *Flood and Coastal Risk Management Conference*. Telford, UK.
- Duncan, A. P., Chen, A. S., Keedwell, E. C., Djordjević, S., & Savić, D. A. (2011). Urban flood prediction in real-time from weather radar and rainfall data using artificial neural networks, *IAHS Publ.* 351.
- Duncan, A., Chen, A. S., Keedwell, E., Djordjevic, S., & Savic, D. (2013). RAPIDS: Early Warning System for Urban Flooding and Water Quality Hazards. Retrieved from <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/16090>
- Environment Agency. (2013). What is the updated Flood Map for Surface Water? Bristol, UK.
- Ghimire, B., Chen, A. S., Guidolin, M., Keedwell, E. C., Djordjević, S., & Savić, D. A. (2013). Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 676.
- Henonin, J., Russo, B., Mark, O., & Gourbesville, P. (2013). Real-time urban flood forecasting and modelling – a state of the art. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3).
- Innovyze. (2015). InfoWorks ICM Help v5.5.
- Jahanbazi, M., & Egger, U. (2014). Application and comparison of two different dual drainage models to assess urban flooding. *Urban Water Journal*, 11(7), 584–595. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.871041>
- Leandro, J., Chen, A. S., Djordjević, S., & Savić, D. A. (2009). Comparison of 1D/1D and 1D/2D Coupled (Sewer/Surface) Hydraulic Models for Urban Flood Simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), 495–504.
- Leitão, J. P., Simões, N. E., Maksimović, Č., Ferreira, F., Prodanović, D., Matos, J. S., & Sá Marques, A. (2010). Real-time forecasting urban drainage models: full or simplified networks? *Water Science and Technology*, 62(9).
- Lhomme, J., Bouvier, C., Mignot, E., & Paquier, A. (2006). One-dimensional GIS-based model compared with a two-dimensional model in urban floods simulation. *Water Science and Technology* 54(6–7), 83–91.
- Liu, L., Liu, Y., Wang, X., Yu, D., Liu, K., Huang, H., & Hu, G. (2015). Developing an effective 2-D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(3), 381–391
- Maksimović, Č., Prodanović, D., Boonya-Aroonnet, S., Leitão, J. P., Djordjević, S., & Allitt, R. (2009). Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. *Journal of Hydraulic Research*, 47(4), 512–523.
- Maksimovic, C., & Prodanovic, D. (2001). Modelling of Urban Flooding—Breakthrough or Recycling of Outdated Concepts. In *Urban Drainage Modeling* (pp. 1–9). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B., & Djordjevi, S. (2004). Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, 299, 284–299.
- Mounce, S. R., Shepherd, W., Sailor, G., Shucksmith, J., & Saul, A. J. (2014). Predicting combined sewer overflows chamber depth using artificial neural networks with rainfall radar data. *Water Science & Technology*, 69(6), 1326.

- Muñoz, C., Wang, L. P., & Willems, P. (2015). Towards a high resolution stochastic rainfall generator for urban applications. In P. Molnar & N. Peleg. (Eds.), *Proceedings of the 10th International Workshop on Precipitation in Urban Areas*.
- Neal, J., Villanueva, I., Wright, N., Willis, T., Fewtrell, T., & Bates, P. (2012). How much physical complexity is needed to model flood inundation? *Hydrological Processes*, 26(15), 2264–2282.
- Ntegeka V, Willems P (2008) Trends and multidecadal oscillations in rainfall extremes, based on a more than 100 years time series of 10 minutes rainfall intensities at Uccle, Belgium. *Water Resources Research* 44:W07402
- Razavi, S., Tolson, B. A., & Burn, D. H. (2012). Review of surrogate modeling in water resources. *Water Resources Research*, 48(7).
- Schmitt, T. G., Thomas, M., & Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, 299(3), 300–311.
- Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2012). Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. *Advances in Water Resources*, 41, 49–64.
- Shapiro, M., & Westervelt, J. (1992). R.MAPCALC An Algebra for GIS and Image Processing. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/gdp/raster/mapcalc-algebra.pdf>
- Shook, K., Pomeroy, J. W., Spence, C., & Boychuk, L. (2013). Storage dynamics simulations in prairie wetland hydrology models: evaluation and parameterization. *Hydrological Processes*, 27(13), 1875–1889. <https://doi.org/10.1002/hyp.9867>
- Simões, N. E., Leitão, J. P., Maksimović, Č., Sá Marques, A., & Pina, R. (2010). Sensitivity analysis of surface runoff generation in urban flood forecasting. *Water Science and Technology*, 61(10), 2595–2601.
- Solomatine, D. P., & Ostfeld, A. (2008). Data-driven modelling: some past experiences and new approaches. *Journal of Hydroinformatics*, 10(1), 3.
- van Dijk, E., van der Meulen, J., Kluck, J., Straatman, J. H. M. (2014). Comparing modelling techniques for analysing urban pluvial flooding. *Water Science & Technology*, 69(2), 305–311.
- Wolfs, V., & Willems, P. (2017). Modular Conceptual Modelling Approach and Software for Sewer Hydraulic Computations. *Water Resources Management*, 31(1), 283–298.
- Yaseen, Z. M., El-Shafie, A., Jaafar, O., Afan, H. A., & Sayl, K. N. (2015). Artificial intelligence based models for stream-flow forecasting: 2000–2015.
- Zhang, S., & Pan, B. (2014). An urban storm-inundation simulation method based on GIS. *Journal of Hydrology*, 517, 260–268.